

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.12.035

基于2型模糊集的多目标农业-生态水土资源优化配置

郭萍^{1,2} 潘琦^{1,2} 岳琼^{1,2} 王奕诚¹ 张洪航¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘要: 针对西北干旱区灌区生态环境脆弱、水资源短缺、复杂不确定性等问题,以石羊河流域红崖山灌区为例,耦合2型模糊集、模糊可信度约束规划和多目标规划等理论方法,构建了基于2型模糊集的多目标农业-生态水土资源优化配置模型。模型以灌溉水损失最小、生态植被灌溉水满意度最大、生态植被灌溉水费用最小和主要粮食作物经济效益最大为目标,对红崖山灌区10个决策单元的地表水、地下水和粮食作物种植面积进行优化配置。求解模型得到不同可信度水平和不确定性程度下的水土资源优化配置方案。结果表明:耦合2型模糊集的模型能够提供丰富的配置方案,水量对可信度水平的敏感性高于不确定性程度,作物种植结构对可信度水平不敏感。以不确定性程度参数为0.5、可信度水平为0.7时为例,生态植被均通过地表水灌溉,作物通过地表水、地下水联合灌溉,玉米的产量和经济效益均大于小麦。相比前人研究,本研究考虑生态植被灌溉需求,优化结果更加真实合理。本研究可为决策者提供较为符合灌区实际的配置方案,为西北干旱区灌区现代化建设提供科学指导。

关键词: 多目标规划; 水土资源; 优化配置; 生态植被; 2型模糊集; 红崖山灌区

中图分类号: TV213; 0221 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)12-0353-13 OSID: 

Multi-objective Modelling for Optimal Allocation of Agricultural – Ecological Water and Land Resources Based on Type – 2 Fuzzy Sets

GUO Ping^{1,2} PAN Qi^{1,2} YUE Qiong^{1,2} WANG Yicheng¹ ZHANG Honghang¹
(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: To handle eco-environment vulnerability, water shortage and complex uncertainties in irrigation districts in arid areas of Northwest China, taking Hongyashan Irrigation District in Shiyang River Basin as an example, a type – 2 fuzzy multi-objective programming model for optimization of agricultural – ecological water and land resources allocation was developed. The developed model integrated type – 2 fuzzy sets, fuzzy credibility-constrained programming, and multi-objective programming, with the objectives of minimum irrigation loss, maximum ecological vegetation irrigation satisfaction, minimum ecological vegetation irrigation cost and maximum economic benefit of main grain crops. The decision variables were surface water, groundwater and planting structure among 10 decision-making units in Hongyashan Irrigation District. The optimal allocation schemes of irrigation water and planting structure under different credibility levels and uncertainty degrees were obtained by solving the model. Optimal results showed that the model coupled with type – 2 fuzzy sets can provide abundant allocation schemes. The sensitivity of allocated water to credibility levels was higher than uncertainty degrees, and the planting structure was not sensitive to credibility levels. When the uncertainty degree was 0.5 and the credibility level was 0.7, the ecological vegetation was totally irrigated by surface water, crops were irrigated by surface water and groundwater, and the yield and economic benefit of maize are higher than that of wheat. Compared with previous studies, the research more considered the irrigation requirement of ecological vegetation, and the optimization results were more realistic and reasonable. The research results can provide decision-makers with allocation schemes which were in line with the actual situation of irrigation districts and provide scientific guidance for the modernization of irrigation districts in arid areas of Northwest China.

Key words: multi-objective programming; water and land resources; optimal allocation; ecological vegetation; type – 2 fuzzy sets; Hongyashan Irrigation District

0 引言

水是农业发展的重中之重,全球约 69% 的淡水资源分配给农业用水^[1]。然而,在全球气候变暖、人类活动加剧、工业规模扩张等影响的共同作用下,全球淡水资源越来越少,农业部门缺水形势严峻。在我国农业用水量大、用水效率低下的西北干旱区灌区,水短缺危机更加严重。为保证充足的农业灌溉用水,灌区不得不挤占生态植被用水,长此以往,生态植被枯萎退化,造成灌区水土流失和土地荒漠化,严重威胁了区域粮食安全^[2]与生态健康^[3]。灌区作为水土资源管理的基本单位,是保障区域粮食供应、促进生态文明建设的基础和根本^[4]。因此,针对灌区作物种植结构、灌溉用水量 and 生态植被需水量,开展农业-生态水土资源优化配置研究,对于保障灌区农业高效绿色发展、维持生态可持续性具有重要意义。

传统的农业水土资源优化配置研究主要分为“以土定水”和“以水定土”两类。TANG 等^[5]先优化了黑河流域作物空间种植结构,又基于此建立了空间水资源优化配置模型;刘静等^[6]则构建了“以水定土,以土量水”的优化模型,分析了不同配水方案下作物种植面积的调整策略。实际上,水资源和土地资源联系紧密、相互制约,不能简单地按照先后顺序对它们分别优化。为体现水土资源的系统性,孙博等^[7]、黄苏宁等^[8]、成琨^[9]提出水资源和土地资源的联合配置方法,并在相应研究区得到了较好的配置方案。然而,由于一些区域地表水不足,在水土资源联合配置过程中,还需抽取地下水来满足区域实际灌溉需求,例如付银环等^[10]建立了区间两阶段随机规划模型对不同灌区地表水、地下水资源进行优化配置;杨改强等^[11]分析了混灌区地表水灌溉历时对地下水灌溉面积的影响,并构建了渠系优化配水模型。上述研究都能一定程度上为灌区水土资源管理提供决策指导,但针对生态环境脆弱的西北干旱灌区,应当在此基础上综合考虑以下因素:①灌溉制度和种植结构的合理规划,以寻求更高的农业用水效率。②水源条件,通过较少的输水成本获取较高的经济收益。③用于维持生态健康的生态植被用水,开展生态-农业水土资源协调配置,保证灌区生态系统可持续发展。然而,目前既考虑水土资源联合配置,又划分输水来源,还要兼顾农业灌溉和生态植被需水的优化模型研究还较少。

在水土资源配置系统中,多目标规划被广泛应用以协调和权衡不同决策主体的利益和需求。YU

等^[12]从节约农业用水、减少污染、提高经济产出 3 方面构建了多目标农业种植结构优化模型;张帆等^[13]以经济效益、社会效益、生态效益为目标函数构建了多目标水资源优化配置模型。随着研究的深入,学者们发现多目标水土资源配置中存在来水量、降水量等不确定性信息,便引入数学规划方法来表征这些不确定性,如陈红光等^[14]引入鲁棒系数表征水资源系统的风险,王友芝等^[15]构建了基于模糊 Me 测度的用水结构优化模型,岳琼等^[16]引入区间规划和模糊可信性约束表征可供水量的不确定性。模糊数学规划是最为常见的一种不确定性方法,在模糊数学规划中,不确定参数被表征为带有隶属度函数的模糊数^[17]。实际上,由于环境的复杂性,数据的波动性等因素,很难获得准确的隶属度函数。因此,有学者提出 2 型模糊数作为传统模糊数的延伸,2 型模糊数中每个点的隶属度也是模糊的,带有二级隶属度属性,能够更好地处理高度不确定性问题,已经被应用在航路规划^[18]、能源^[19]、选址^[20]、运输^[21]等领域。WANG 等^[22]将区间 2 型模糊规划方法应用于地表水、地下水的联合调度中,YUE 等^[23]引入 2 型模糊集(Type-2 fuzzy sets, T2FS)来表征水资源配置系统中水库供水和大气降水所包含的复杂不确定性。尽管已经有学者将 2 型模糊数引入优化配置系统中,但将其应用于农业-生态水土资源优化配置的研究还鲜有报道。此外,现有研究并未考虑水土资源配置系统内部由模糊事件所导致的约束违规风险问题。

综上,本研究以我国西北干旱区石羊河流域的下游灌区——红崖山灌区为研究区域,将输水来源划分为地表水和地下水,兼顾农业作物种植结构、灌溉用水和生态植被用水的协调配置,引入多目标规划协调系统的冲突目标,采用 2 型模糊数表征系统中的复杂不确定性,采用模糊可信性约束规划权衡系统收益与风险,构建基于 T2FS 的灌区多目标农业-生态水土资源优化配置模型,以期灌区农业发展和生态建设提供有效的决策支撑。

1 模型建立和求解

1.1 2 型模糊数学规划

T2FS 是由 ZADEH 在 1975 年提出的,它在传统 1 型模糊集的基础上增加了模糊集中隶属度函数的不确定性,即,T2FS 中每个模糊数的隶属度也是具有模糊属性的(图 1)^[24]。T2FS 能够更有效地描述和处理复杂模糊不确定性问题。假设 $\tilde{E}$ 是一个 T2FS,则表达形式为^[25]

$$\tilde{E} = \{((x,u), \mu_{\tilde{E}}(x,u)) : \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1]\}$$

(1)

式中

x ——定义域 X 中的主要变量

u ——定义域 J_x 中的次要变量

J_x ——主隶属度

$\mu_{\tilde{E}}(x,u)$ ——次级隶属度函数或 2 型隶属度函数, $\mu_{\tilde{E}}(x,u) \subseteq [0,1]$

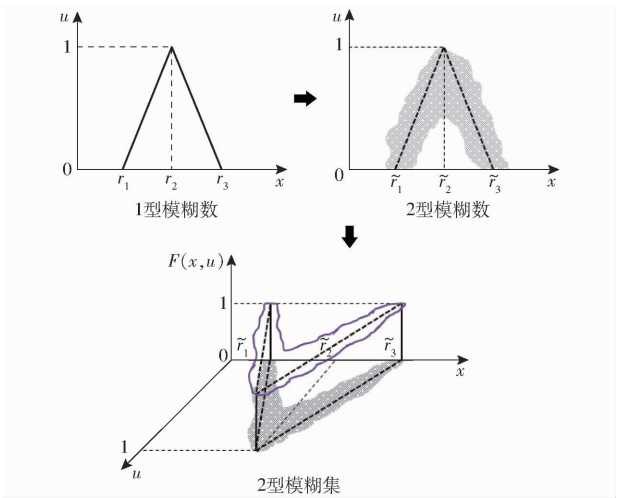


图 1 T2FS 示意图^[22]

Fig. 1 Type-2 fuzzy sets

为了方便理解和减少计算量,学者们通常使用 2 型三角模糊变量来解决带有 2 型模糊属性的问题。假设有一个 2 型三角模糊变量 $\tilde{\xi}$,其可以表示为 $\tilde{\xi} = (r_1, r_2, r_3; \theta_l, \theta_r)$,其中 r_1, r_2, r_3 为实数, $\theta_l, \theta_r \in [0,1]$,为表征不确定性程度的参数。对于 $x \in [r_1, r_3]$, $\tilde{\xi}$ 的二次可能性隶属函数定义为^[24]

$$\tilde{\mu}_{\tilde{\xi}}(x) =$$

$$\begin{cases} \left(\frac{x-r_1}{r_2-r_1} - \theta_l \frac{x-r_1}{r_2-r_1}, \frac{x-r_1}{r_2-r_1} + \theta_l \frac{x-r_1}{r_2-r_1} \right) & \left(x \in \left[r_1, \frac{r_1+r_2}{2} \right] \right) \\ \left(\frac{x-r_1}{r_2-r_1} - \theta_l \frac{r_2-x}{r_2-r_1}, \frac{x-r_1}{r_2-r_1} + \theta_l \frac{r_2-x}{r_2-r_1} \right) & \left(x \in \left(\frac{r_1+r_2}{2}, r_2 \right] \right) \\ \left(\frac{r_3-x}{r_3-r_2} - \theta_l \frac{x-r_2}{r_3-r_2}, \frac{r_3-x}{r_3-r_2} + \theta_l \frac{x-r_2}{r_3-r_2} \right) & \left(x \in \left(r_2, \frac{r_2+r_3}{2} \right] \right) \\ \left(\frac{r_3-x}{r_3-r_2} - \theta_l \frac{r_3-x}{r_3-r_2}, \frac{r_3-x}{r_3-r_2} + \theta_l \frac{r_3-x}{r_3-r_2} \right) & \left(x \in \left(\frac{r_2+r_3}{2}, r_3 \right] \right) \end{cases}$$

(2)

尽管 2 型三角模糊集这一特例已经减少了一定的计算量,但其隶属度函数的模糊性仍然使计算存在很大的困难。为此,QIN 等^[26]提出了一种基于临界值(CV)的去模糊化方法,该方法引入了乐观、悲观和中性 3 个临界值来表征模糊变量,将 2 型模糊变量降型为 1 型模糊变量,以降低计算复杂性。本

研究选取中立临界值为 2 型模糊变量降型,其定义为^[26]

$$CV[\tilde{\xi}] = \sup_{\alpha \in [0,1]} [\alpha \wedge Cr\{\tilde{\xi} \geq \alpha\}]$$

(3)

式中

α ——可信度水平

$Cr\{\cdot\}$ ——模糊事件的可信度测度

$\sup[\cdot]$ ——最小上界

通过定理 1 可以得到中立临界值的期望值,由此得到去模糊化的 2 型模糊数。

定理 1^[26]: 设 $\tilde{\xi}_i$ 为 2 型三角模糊变量 $\tilde{\xi} = (r_1, r_2, r_3; \theta_l, \theta_r)$ 中立临界值的约简形式,即

$$E_n[\tilde{\xi}_i] = \frac{r_1 + 2r_2 + r_3}{4} + \frac{r_1 + 2r_2 + r_3}{8} \left[\frac{1}{\theta_r} - \frac{1}{\theta_l} - \frac{(1 + \theta_r) \ln(1 + \theta_r)}{\theta_r^2} + \frac{(1 + \theta_l) \ln(1 + \theta_l)}{\theta_l^2} \right]$$

(4)

式中 $E_n[\cdot]$ ——中立临界值的期望值

尽管 CV 约简法能够对目标函数及常规约束条件中存在的 2 型模糊变量进行模糊降型,但在处理模糊可信度约束中的 2 型模糊变量时仍存在局限。因此,学者们又将可信度测度与 CV 约简法结合,并得到了定理及推论为:

定理 2^[24]: 设 $\tilde{\xi}_i$ 为通过 CV 约简法得到的 2 型三角模糊变量, $\tilde{\xi}_i = (r_{1,i}, r_{2,i}, r_{3,i}; \theta_{l,i}, \theta_{r,i})$ ($i = 1, 2, \dots, n$)。假设 $\tilde{\xi}_1, \tilde{\xi}_2, \dots, \tilde{\xi}_n$ 相互独立, $k_i \geq 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$)。

假设可信度水平 $\alpha \in (0.5, 1]$, 若 $\alpha \in (0.5, 0.75]$, 则 $Cr\left\{\sum_{i=1}^n k_i \tilde{\xi}_i \leq t\right\} \geq \alpha$ (t 为约束变量) 可以等价

$$\sum_{i=1}^n \frac{(2\alpha - 1)k_i r_{3,i} + [2(1 - \alpha) + (3 - 4\alpha)\theta_{l,i}]k_i r_{2,i}}{1 + (3 - 4\alpha)\theta_{l,i}} \leq t$$

(5)

若 $\alpha \in (0.75, 1]$, 则 $Cr\left\{\sum_{i=1}^n k_i \tilde{\xi}_i \leq t\right\} \geq \alpha$ 可以等价

$$\sum_{i=1}^n \frac{[2\alpha - 1 + (4\alpha - 3)\theta_{r,i}]k_i r_{3,i} + 2(1 - \alpha)k_i r_{2,i}}{1 + (4\alpha - 3)\theta_{r,i}} \leq t$$

(6)

推论 1^[24]: 根据定理 2, 易得 $Cr\left\{\sum_{i=1}^n k_i \tilde{\xi}_i \geq t\right\} \geq \alpha$ 的等价表达式。首先将 $Cr\left\{\sum_{i=1}^n k_i \tilde{\xi}_i \geq t\right\} \geq \alpha$ 进行转换

$$Cr\left\{\sum_{i=1}^n k_i \tilde{\xi}_i \geq t\right\} \geq \alpha \Rightarrow Cr\left\{\sum_{i=1}^n -k_i \tilde{\xi}_i \leq -t\right\} \geq \alpha \Rightarrow$$
$$Cr\left\{\sum_{i=1}^n k_i \tilde{\xi}'_i \leq t'\right\} \geq \alpha \tag{7}$$

其中, $\tilde{\xi}'_i = -\tilde{\xi}_i = (-r_{3,i}, -r_{2,i}, -r_{1,i}; \theta_{r,i}, \theta_{l,i}) (i=1, 2, \cdots, n), t' = -t$ 。

假设可信度水平 $\alpha \in (0.5, 1]$, 若 $\alpha \in (0.5, 0.75]$, 则 $Cr\left\{\sum_{i=1}^n k_i \tilde{\xi}'_i \leq t'\right\} \geq \alpha$ 可以等价为

$$\sum_{i=1}^n \frac{(2\alpha-1)k_i r_{1,i} + [2(1-\alpha) + (3-4\alpha)\theta_{r,i}]k_i r_{2,i}}{1 + (3-4\alpha)\theta_{r,i}} \geq t \tag{8}$$

若 $\alpha \in (0.75, 1]$, 则 $Cr\left\{\sum_{i=1}^n k_i \tilde{\xi}'_i \leq t'\right\} \geq \alpha$ 可以等价为

$$\sum_{i=1}^n \frac{[2\alpha-1 + (4\alpha-3)\theta_{l,i}]k_i r_{1,i} + 2(1-\alpha)k_i r_{2,i}}{1 + (4\alpha-3)\theta_{l,i}} \geq t \tag{9}$$

1.2 灌区多目标农业-生态水土资源优化配置模型

灌区水土资源优化配置是包含多个决策目标和不同决策者立场的复杂系统问题^[27]。本研究分别从灌区水利管理所、林业部门和农民的角度出发, 考虑了灌溉水损失最小化、生态植被灌溉水满意度最大化、生态植被灌溉水费用最小化和主要粮食作物净经济效益最大化4个目标, 并结合2型模糊数来表征地表水供水量、地下水供水量、生态植被需水量、作物市场价格、种子需求等数据存在的不确定性, 建立了地表水、地下水联合调度的灌区多目标农业-生态水土资源优化配置模型, 对灌区地表水、地下水和主要粮食作物的种植面积进行优化。

1.2.1 目标函数

(1) 灌溉水损失最小: 从渠道或管道输水、取水的过程中, 会存在一定的水量损失, 若损失过多, 会导致灌溉效率低下, 从而造成水资源浪费, 因此建立灌溉水损失最小化目标

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^3 W_{ij}^s A_{ij} (1 - \eta_i^{\text{canal}}) +$$
$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^3 W_{ij}^g A_{ij} (1 - \eta_i^{\text{pipe}}) +$$
$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^3 (W_{ij}^s + W_{ij}^g) A_{ij} (1 - \eta_i^{\text{field}}) \tag{10}$$

式中 f_1 ——灌溉水损失量, m^3
 j ——作物及生态植被编号, j 取 1、2、3, 分别表示小麦、玉米、生态植被

W_{ij}^s ——决策单元 i 中作物或生态植被 j 的地表水灌水量, m^3/hm^2
 A_{ij} ——决策单元 i 中作物或生态植被 j 的面积, hm^2
 η_i^{canal} ——渠系水利用系数
 W_{ij}^g ——决策单元 i 中作物或生态植被 j 的地下水灌水量, m^3/hm^2
 η_i^{pipe} ——管道水利用系数
 η_i^{field} ——田间水利用系数

(2) 生态植被灌溉水满意度最大: 为保证灌区内生态植被灌溉水量的有效供给, 应当使生态植被配水量尽可能接近植被生态需水量的最大值, 因此建立生态植被灌溉水满意度最大化目标

$$\max f_2 = d + (1-d) \frac{\sum_{i=1}^I (W_{i3}^s + W_{i3}^g + P_3) A_{i3} - \widetilde{W}_{i,\max}^{\text{eco}}}{\sum_{i=1}^I (\widetilde{W}_{i,\max}^{\text{eco}} - \widetilde{W}_{i,\min}^{\text{eco}})} \tag{11}$$

式中 f_2 ——生态植被灌溉水满意度
 d ——生态植被灌溉水满意度, 一般可取 0.5
 P_3 ——生态植被生长季内有效降水量, m^3/hm^2
 $\widetilde{W}_{i,\max}^{\text{eco}}$ ——决策单元 i 的生态植被需水量最大值, m^3 , 为 2 型模糊数
 $\widetilde{W}_{i,\min}^{\text{eco}}$ ——决策单元 i 的生态植被需水量最小值, m^3 , 为 2 型模糊数

(3) 生态植被灌溉水费用最小: 生态植被灌溉能够有效提高植被存活率、维持生态健康, 但灌区过度关注生态植被灌溉会使生态治理资金投入过大, 造成其他投入的减少, 不利于灌区整体发展, 因此建立生态植被灌溉水费用最小化目标

$$\min f_3 = (W_{i3}^s A_{i3} C_s^{\text{water}} + W_{i3}^g A_{i3} C_g^{\text{water}}) / \eta_i^{\text{field}} \tag{12}$$

式中 f_3 ——生态植被灌溉水费用, 元
 C_s^{water} ——地表水水价, 元/ m^3
 C_g^{water} ——地下水水价, 元/ m^3

(4) 主要粮食作物净经济效益最大: 灌区水土资源优化的目的是保证农作物水量需求和种植面积, 尽可能获得更高的产量, 从而获取更好的经济效益, 因此建立主要粮食作物净经济效益最大化目标

$$\max f_4 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^2 Y_j A_{ij} \widetilde{C}_j^{\text{market}} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^2 \widetilde{N}_j A_{ij} \widetilde{C}_j^{\text{seed}} -$$
$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^2 (W_{ij}^s A_{ij} C_s^{\text{water}} + W_{ij}^g A_{ij} C_g^{\text{water}}) / \eta_i^{\text{field}} \tag{13}$$

其中 $Y_j = \beta_j (W_{ij}^s + W_{ij}^g + P_j) A_{ij} + \gamma_j$ (14)
式中 f_4 ——主要粮食作物净经济效益, 元

Y_j ——作物 j 单产, kg/hm^2

$\tilde{C}_j^{\text{market}}$ ——作物 j 市场价格, 元/ kg , 为 2 型模糊数

$\tilde{N}_j$ ——作物 j 每公顷种子需求量, kg/hm^2 , 为 2 型模糊数

$\tilde{C}_j^{\text{seed}}$ ——作物 j 种子价格, 元/ kg , 为 2 型模糊数

β_j ——水分生产函数的一次项

P_j ——作物 j 生育期内有效降水量, m^3/hm^2

γ_j ——水分生产函数的常数项

1.2.2 约束条件

(1) 地表水、地下水供水约束: 每个决策单元的配水量应介于该决策单元能够提供的水量之间, 即

$$Cr\left\{\tilde{W}_{i,\min}^s \leq \sum_{j=1}^3 W_{ij}^s A_{ij} \leq \tilde{W}_{i,\max}^s\right\} \geq \lambda \quad (\forall i, j)$$

(15)

$$Cr\left\{\tilde{W}_{i,\min}^g \leq \sum_{j=1}^3 W_{ij}^g A_{ij} \leq \tilde{W}_{i,\max}^g\right\} \geq \lambda \quad (\forall i, j)$$

(16)

式中 $\tilde{W}_{i,\min}^s$ ——决策单元 i 的地表水供水最小值, m^3 , 为 2 型模糊数

$\tilde{W}_{i,\max}^s$ ——决策单元 i 的地表水供水最大值, m^3 , 为 2 型模糊数

λ ——可信度水平

$\tilde{W}_{i,\min}^g$ ——决策单元 i 的地下水供水最小值, m^3 , 为 2 型模糊数

$\tilde{W}_{i,\max}^g$ ——决策单元 i 的地下水供水最大值, m^3 , 为 2 型模糊数

(2) 作物需水量约束: 每种作物的配水量应介于确保该作物正常生长的需水量之间, 即

$$W_{ij,\min}^{\text{crop}} \leq W_{ij}^s + W_{ij}^g + P_j \leq W_{ij,\max}^{\text{crop}} \quad (j=1, 2) \quad (17)$$

式中 $W_{ij,\min}^{\text{crop}}$ ——决策单元 i 中作物 j 需水量最小

值, m^3/hm^2

$W_{ij,\max}^{\text{crop}}$ ——决策单元 i 中作物 j 需水量最大值, m^3/hm^2

(3) 生态植被需水量约束: 生态植被的配水量应介于确保该植被正常生长的生态需水量之间, 即

$$\tilde{W}_{i,\min}^{\text{eco}} \leq (W_{i3}^s + W_{i3}^g + P_j) A_{i3} \leq \tilde{W}_{i,\max}^{\text{eco}} \quad (\forall i)$$

(18)

式中 $\tilde{W}_{i,\min}^{\text{eco}}$ ——决策单元 i 中生态植被需水量最小值, m^3/hm^2

$\tilde{W}_{i,\max}^{\text{eco}}$ ——决策单元 i 中生态植被需水量最大值, m^3/hm^2

(4) 作物种植面积约束: 每个决策单元中每种作物的种植面积应介于该决策单元能为各作物提供的土地面积之间, 即

$$A_{ij}^{\min} \leq A_{ij} \leq A_{ij}^{\max} \quad (j=1, 2) \quad (19)$$

(5) 非负约束: 作物配水量、生态植被配水量和作物面积都只能取零或正数, 即

$$W_{ij}^s \geq 0 \quad (\forall i, j) \quad (20)$$

$$W_{ij}^g \geq 0 \quad (\forall i, j) \quad (21)$$

$$A_{ij} \geq 0 \quad (j=1, 2) \quad (22)$$

1.3 模型求解

求解含有 2 型模糊数学规划的多目标模型的核心是将不确定的多目标规划模型转化为确定的单目标规划模型。首先将 2 型模糊变量去模糊化。根据 1.1 节的定理 1, 将模型目标函数和常规约束中的 2 型三角模糊变量表示为 $\tilde{W}_{i,\max}^{\text{eco}} = CV[\tilde{W}_{i,\max}^{\text{eco}}]$ 、 $\tilde{W}_{i,\min}^{\text{eco}} = CV[\tilde{W}_{i,\min}^{\text{eco}}]$ 、 $\tilde{C}_j^{\text{market}} = CV[\tilde{C}_j^{\text{market}}]$ 、 $\tilde{N}_j = CV[\tilde{N}_j]$ 和 $\tilde{C}_j^{\text{seed}} = CV[\tilde{C}_j^{\text{seed}}]$; 根据定理 2 及其推论, 处理模型中的模糊可信度约束。引入模糊可信度约束的优化模型研究均表明, 有意义的可信度置信水平应大于 0.5^[28]。因此, 根据式(4)~(9)可得去模糊化后的等价模型为

$$\begin{cases} \min f_1 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^3 W_{ij}^s A_{ij} (1 - \eta_i^{\text{canal}}) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^3 W_{ij}^g A_{ij} (1 - \eta_i^{\text{pipe}}) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^3 (W_{ij}^s + W_{ij}^g) A_{ij} (1 - \eta_i^{\text{field}}) \\ \max f_2 = d + (1 - d) \frac{\sum_{i=1}^I (W_{i3}^s + W_{i3}^g + P_3) A_{i3} - CV[\tilde{W}_{i,\max}^{\text{eco}}]}{\sum_{i=1}^I (CV[\tilde{W}_{i,\max}^{\text{eco}}] - CV[\tilde{W}_{i,\min}^{\text{eco}}])} \\ \min f_3 = \sum_{i=1}^I (W_{i3}^s A_{i3} C_s^{\text{water}} + W_{i3}^g A_{i3} C_g^{\text{water}}) / \eta^{\text{field}} \\ \max f_4 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^2 Y_j A_{ij} CV[\tilde{C}_j^{\text{market}}] - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^2 (W_{i3}^s A_{ij} C_s^{\text{water}} + W_{i3}^g A_{ij} C_g^{\text{water}}) / \eta^{\text{field}} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^2 CV[\tilde{N}_j] A_{ij} CV[\tilde{C}_j^{\text{seed}}] \end{cases} \quad (23)$$

s. t. {

$$\sum_{j=1}^3 W_{ij}^s A_{ij} \geq \begin{cases} \frac{(2\lambda - 1) W_{i,\min,3}^s + [2(1 - \lambda) + (3 - 4\lambda) \theta_{l,i}^{W_{\min}^s}] W_{i,\min,2}^s}{1 + (3 - 4\lambda) \theta_{l,i}^{W_{\min}^s}} & (\lambda \in (0.5, 0.75]) \\ \frac{[2\lambda - 1 + (4\lambda - 3) \theta_{r,i}^{W_{\min}^s}] W_{i,\min,3}^s + 2(1 - \lambda) W_{i,\min,2}^s}{1 + (4\lambda - 3) \theta_{r,i}^{W_{\min}^s}} & (\lambda \in (0.75, 1]) \end{cases}$$

$$\sum_{j=1}^3 W_{ij}^s A_{ij} \leq \begin{cases} \frac{(2\lambda - 1) W_{i,\max,1}^s + [2(1 - \lambda) + (3 - 4\lambda) \theta_{r,i}^{W_{\max}^s}] W_{i,\max,2}^s}{1 + (3 - 4\lambda) \theta_{r,i}^{W_{\max}^s}} & (\lambda \in (0.5, 0.75]) \\ \frac{[2\lambda - 1 + (4\lambda - 3) \theta_{l,i}^{W_{\max}^s}] W_{i,\max,1}^s + 2(1 - \lambda) W_{i,\max,2}^s}{1 + (4\lambda - 3) \theta_{l,i}^{W_{\max}^s}} & (\lambda \in (0.75, 1]) \end{cases}$$

$$\sum_{j=1}^3 W_{ij}^g A_{ij} \geq \begin{cases} \frac{(2\lambda - 1) W_{i,\min,3}^g + [2(1 - \lambda) + (3 - 4\lambda) \theta_{l,i}^{W_{\min}^g}] W_{i,\min,2}^g}{1 + (3 - 4\lambda) \theta_{l,i}^{W_{\min}^g}} & (\lambda \in (0.5, 0.75]) \\ \frac{[2\lambda - 1 + (4\lambda - 3) \theta_{r,i}^{W_{\min}^g}] W_{i,\min,3}^g + 2(1 - \lambda) W_{i,\min,2}^g}{1 + (4\lambda - 3) \theta_{r,i}^{W_{\min}^g}} & (\lambda \in (0.75, 1]) \end{cases}$$

$$\sum_{j=1}^3 W_{ij}^g A_{ij} \leq \begin{cases} \frac{(2\lambda - 1) W_{i,\max,1}^g + [2(1 - \lambda) + (3 - 4\lambda) \theta_{r,i}^{W_{\max}^g}] W_{i,\max,2}^g}{1 + (3 - 4\lambda) \theta_{r,i}^{W_{\max}^g}} & (\lambda \in (0.5, 0.75]) \\ \frac{[2\lambda - 1 + (4\lambda - 3) \theta_{l,i}^{W_{\max}^g}] W_{i,\max,1}^g + 2(1 - \lambda) W_{i,\max,2}^g}{1 + (4\lambda - 3) \theta_{l,i}^{W_{\max}^g}} & (\lambda \in (0.75, 1]) \end{cases}$$

$$W_{ij,\min}^{\text{crop}} \leq W_{ij}^s + W_{ij}^g + P_j \leq W_{ij,\max}^{\text{crop}} \quad (j = 1, 2)$$

$$CV[\widehat{W}_{i,\min}^{\text{eco}}] \leq (W_{i3}^s + W_{i3}^g + P_j) A_{i3} \leq CV[\widehat{W}_{i,\max}^{\text{eco}}]$$

$$A_{ij}^{\min} \leq A_{ij} \leq A_{ij}^{\max} \quad (j = 1, 2)$$

$$W_{ij}^s \geq 0$$

$$W_{ij}^g \geq 0$$

$$A_{ij} \geq 0$$

(24)

选定任一可信度水平,使用最小偏差法将所建立的多目标模型转换为单目标模型

$$\min F = \min \left(\omega_1 \frac{f_1 - f_{1,\min}}{f_{1,\max} - f_{1,\min}} + \omega_2 \frac{f_{2,\max} - f_2}{f_{2,\max} - f_{2,\min}} + \right. \\ \left. \omega_3 \frac{f_3 - f_{3,\min}}{f_{3,\max} - f_{3,\min}} + \omega_4 \frac{f_{4,\max} - f_4}{f_{4,\max} - f_{4,\min}} \right) \quad (25)$$

其中 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1$

式中 $\omega_1、\omega_2、\omega_3、\omega_4$ ——目标函数权重

$f_{1,\max} f_{2,\max} f_{3,\max} f_{4,\max}$ ——目标函数最大值

$f_{1,\min} f_{2,\min} f_{3,\min} f_{4,\min}$ ——目标函数最小值

2 实例研究

2.1 研究区域概况

红崖山灌区(38°23′~39°04′N,102°53′~103°41′E)位于甘肃省民勤县境内,是石羊河流域(37°02′~39°17′N,100°57′~104°12′E)下游唯一的大型灌区。因处于绿洲带腹地,素有“沙漠绿洲”之称。灌区多年平均降水量 113.2 mm,年均蒸发量 2 675.6 mm,年均气温 8.8℃,昼夜温差大、日照时

数长,全年无霜期 152 d,特别适宜小麦、玉米、葵花、茴香等农作物生长,是我国典型的内陆干旱区和灌溉农业区。红崖山灌区灌溉面积 4.31 万 hm²,其灌溉用水分为地表水和地下水两部分。受石羊河流域大气环境变化、上中游人类活动加剧、上游调蓄工程建成和中游地下水开发等多种因素影响,石羊河进入民勤境内的径流自 20 世纪 50 年代以来呈逐年减少的趋势,红崖山灌区也因此受到较为严重的缺水风险。自 2007 年《石羊河流域重点治理规划》^[29]实施后,石羊河的来水量逐年增加,红崖山灌区面临的水资源风险逐步缓解,但是恶劣的生态环境、不合理的种植结构和水资源分配制度仍然制约着该地区发展,作物与作物间、农业与生态间的用水矛盾依然突出。考虑到红崖山灌区面积较大,存在空间变异性,且灌区内设置了多个管理站分区域管理,为细化研究,本文根据土地利用类型分布及干支渠分布将红崖山灌区分为 11 个决策单元,其中决策单元 11 为裸地,因此本文不考虑其优化配置情况。研究区域示意图如图 2 所示。

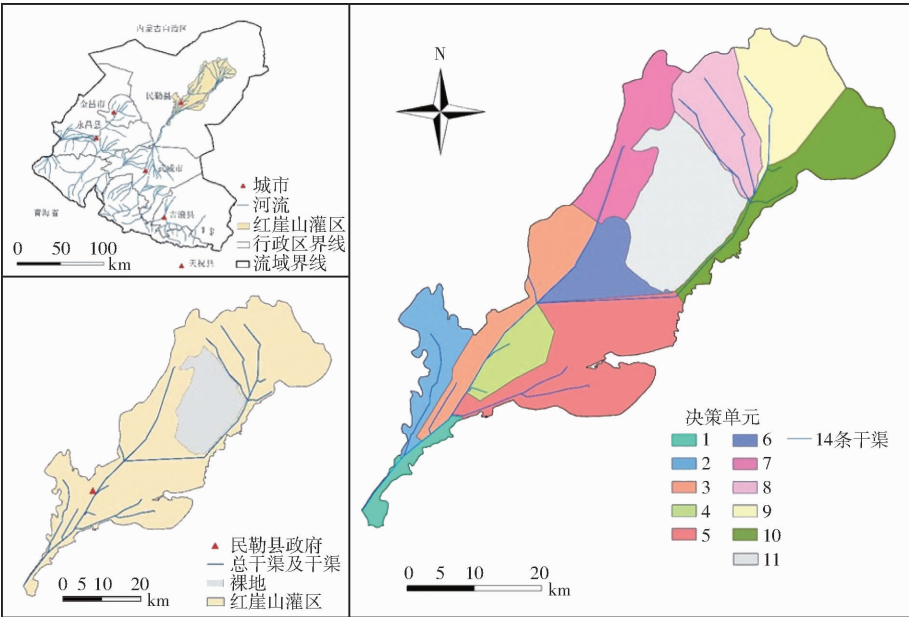


图 2 研究区域示意图
Fig.2 Study area

2.2 数据来源

以红崖山灌区 10 个决策单元的主要粮食作物（小麦、玉米）和生态植被为研究对象,进行主要粮食作物的水土资源优化配置和生态植被的水资源优化配置。模型中的数据主要通过查询统计年鉴、开展实地调研、阅读文献、浏览相关网站等方式获取。渠系水利用系数、管道水利用系数、田间水利用系数分别为 0.68、0.94 和 0.92；地表水和地下水价分别为 0.266、0.342 元/m³。作物水分生产函数主要参考李霆^[30]的研究,其中作物有效降水量来源于中国气象数据网（[http:// data. cma. cn/](http://data.cma.cn/)）,选取 2010—2019 年作物生育期内民勤气象台站的数据经过核算得到,见表 1。作物市场价格、种子需求量、种子价格见表 2。地表水、地下水供水量采用 2 型模糊

数进行表征,其中上限值通过多年的红崖山灌区水资源分配方案获得,下限值由上限值乘以折减系数 0.8 确定。生态植被需水量的上下限通过空间植被生态需水量估算方法确定^[31-32],由于得到的生态植被需水量是一个估算值,具有模糊特征,因此同样引入 T2FS 对其进行表征。作物需水量的上下限通过作物灌溉制度获取。作物种植面积上下限通过土地利用类型数据^[33]和实地调研资料综合核算得到,见表 3。

表 1 作物水分生产函数参数

Tab.1 Parameters of crop water production functions

作物类型	水分生产函数系数		生育期内有效降水量/ (m ³ ·hm ⁻²)
	β	γ	
小麦	1.641 5	-1 154.40	381.6
玉米	1.552 0	-405.14	677.9

表 2 作物市场价格、种子需求量和种子价格

Tab.2 Crop market prices, seed demand and seed prices

作物类型	市场价格/(元·kg ⁻¹)	种子需求量/(kg·hm ⁻²)	种子价格/(元·kg ⁻¹)
小麦	(1.30, 2.42, 3.00; θ _{r,1} , θ _{l,1})	(427.50, 450.00, 495.00; θ _{r,1} , θ _{l,1})	(3.91, 4.60, 5.52; θ _{r,1} , θ _{l,1})
玉米	(2.00, 2.44, 4.00; θ _{r,2} , θ _{l,2})	(30.00, 37.50, 48.75; θ _{r,2} , θ _{l,2})	(17.60, 22.00, 27.50; θ _{r,2} , θ _{l,2})

表 3 作物种植面积约束

Tab.3 Constraints of crop planting area

决策单元	下限值		上限值		决策单元	下限值		上限值	
	小麦	玉米	小麦	玉米		小麦	玉米	小麦	玉米
1	129	57	143	64	7	810	360	900	400
2	400	178	444	198	8	874	389	971	432
3	1 390	619	1 544	687	9	644	287	716	319
4	644	286	715	318	10	1 062	473	1 180	525
5	575	256	639	284	总计	7 417	3 300	8 239	3 666
6	889	395	987	439					

3 结果与分析

3.1 目标值

取可信度水平为 0.6、0.7、0.8、0.9 和 1.0,取不确定性程度参数为 0、0.2、0.5、0.8 和 1.0,便可以获得不同可信度水平和不确定性程度下的 25 组优化决策方案。每组优化方案的灌溉水损失量、生态植被灌溉水满意度、生态植被灌溉水费用及主要粮食作物净经济效益如图 3 所示。在任一不确定性程度下,随着可信度水平的增大,目标值均呈现明显的下降趋势,这说明系统约束条件面临的违规风险越低,目标值就

越趋于保守,只有高风险、高投资才能获得高回报、高收益。当可信度水平为 0.6 和 0.7 时,随着不确定性程度参数的增大,目标值均呈现上升趋势,而当可信度水平为 0.8、0.9 和 1.0 时,目标值均随着参数的增大呈现下降趋势,这是可信度水平以 0.75 为界的 2 个不同等价表达式导致的,符合表达式的数学内涵。可以发现,模型目标值对可信度水平的敏感程度大于对不确定性程度参数的敏感程度。不同可信度水平和不确定性程度下的优化配置结果为灌区提供了丰富的水土资源管理方案,同时有助于管理者结合自身风险偏好选取合适的决策情景。

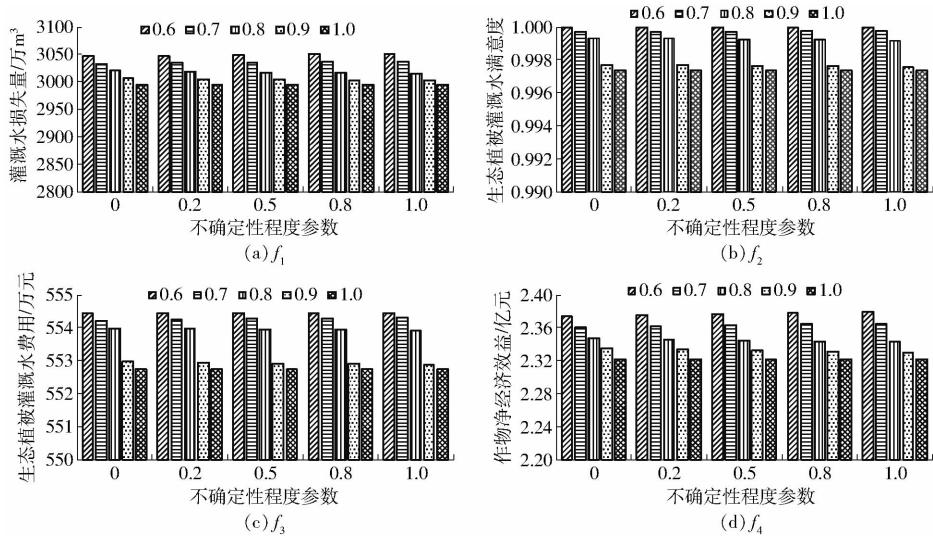


图 3 不同不确定性程度下不同可信度水平的目标值

Fig. 3 Objective values of different credibility levels under different uncertainty levels

3.2 优化配水量

图 4 为不同可信度水平下不同不确定性程度的总配水量优化结果。总配水量在不同情景下的变化与优化目标值基本一致,均表现为随着可信度的增大而降低,随着不确定性程度参数的增大而增大(可信度水平为 0.6 和 0.7)或降低(可信度水平为 0.8、0.9 和 1.0)。以可信度水平 0.7 和 1.0 为例,总配水量为[9 034. 31, 9 049. 17]万 m³和定值 8 875. 68 万 m³,说明总配水量对于不确定性程度参数变化的敏感程度较低,配水量为定值是由于当违规风险较低时,可供水量极其有限而导

致的。因此,为方便研究,本研究选取不确定性程度参数为 0.5 时的结果展开具体分析。表 4 为当不确定性程度参数为 0.5 时的农业和生态植被配水量。其中,农业配水量随着可信度的增大明显降低,而生态植被配水量的变化趋于平稳,这说明农业配水量对于可信度水平的变化十分敏感,而生态植被配水量对于可信度水平的变化敏感程度很低。结合图 3b 可以看出,尽管生态植被灌溉水满意度随着可信度水平的增大有所下降,但下降幅度很小,也就是说,模型在任何情景下都尽可能保证了生态植被用水的供给,使生态植被灌溉水满意度始终处于高位。近年来,生态文明建设和生态可持续性成为诸多学者研究的热点,灌区生态的可持续发展也应当被重视,尤其是在西北干旱区下游生态环境恶劣、气候条件干旱的灌区。只有区域的生态系统实现良性循环,才能为人们的生产生活提供更好的基础和条件。优化模型提供的配水方案最大程度满足了灌区生态植被的用水需求,对恢复和补偿下游灌区生态环境具有重要意义,能够与生态文明建设理念相契合。

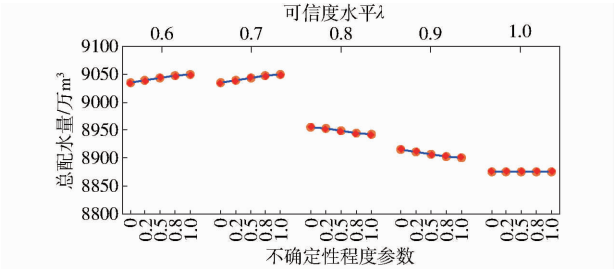


图 4 不同可信度水平下不同不确定性程度的总配水量

Fig. 4 Total water allocation of different uncertainty levels under different credibility levels

表 4 农业和生态植被配水量

Tab.4 Water allocation of agricultural and ecological vegetation

λ	农业配水量	生态植被配水量
0.6	7 125.84	1 917.61
0.7	7 084.89	1 917.02
0.8	7 031.96	1 915.93
0.9	6 994.00	1 912.35
1.0	6 963.94	1 911.74

选取不确定性程度参数为 0.5、可信度水平为 0.7 时各决策单元的配水结果进行深入分析。图 5 为各个决策单元中主要粮食作物小麦、玉米及生态植被的地表和地下水配水结果。模型结果显示,生态植被均使用地表水灌溉,这是因为地表水相比地下水来说价格低,为了兼顾生态植被灌溉水费用最小这一目标,优化模型在地表水充足的前提下选择全部使用价格较低的地表水灌溉生态植被。在实际应用情景中,由于生态植被的灌溉还需要考虑灌水车的运输成本、人工成本等现实因素,因此使用地表水灌溉是完全符合灌区实际的。主要粮食作物则通过地表水和地下水协调配置、共同灌溉,从图 5 可以看出,每个决策单元均同时使用了地表水和地下水灌溉作物,结合实际情况,位于渠道首端的作物可以通过地表水直接灌溉,位于渠道尾端的作物则可以抽取地下水进行灌溉,这样既解决了灌区地表水短缺的问题,又减少了渠道输送过程中产生的水损失,提高了水资源的利用率。在该情景中,模型具体表现为小麦主要由地表水灌溉,决策单元 1、5、10 由于地表水有限分别补充 37.83、274.27、237.48 万 m³ 的

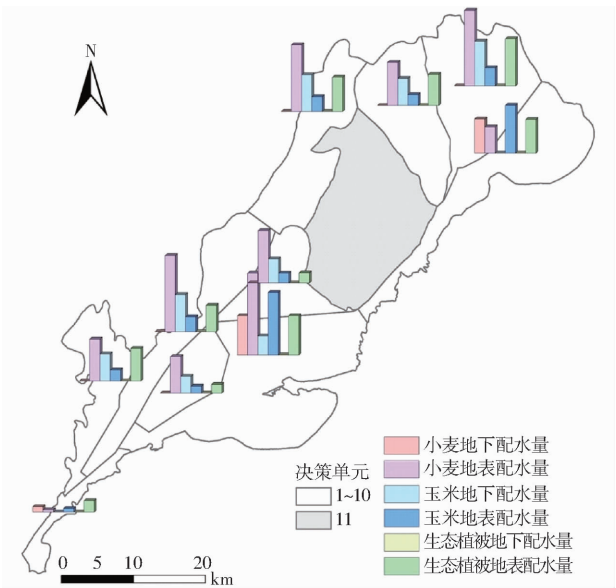


图 5 各决策单元作物及生态植被地表、地下配水结果
Fig.5 Surface water and groundwater allocation of crops and ecological vegetation in each decision-making unit

下水;玉米则大多数通过两种水源联合调度灌溉,决策单元 1、10 仅使用地表水灌溉即可。产生这种情况的原因是小麦的市场价格低于玉米,其种子价格又高于玉米,因此主要使用价格便宜的地表水灌溉来降低种植成本,当地表水供给不足时,便使用价格略高的地下水补充灌溉玉米,以满足收益更高的玉米的水量需求。

3.3 主要粮食作物种植结构

在水土资源优化配置中,种植结构也对系统的整体效益存在显著影响。表 5 为不确定性程度参数为 0.5 时灌区主要粮食作物的种植面积。可以看出,小麦和玉米两种作物的种植面积随可信度水平增减的变化并不明显,小麦的种植面积始终处于 7 417 hm²,玉米的种植面积也基本保持在 3 660 ~ 3 666 hm² 范围内。这种结果的出现一方面说明模型对于种植面积的约束条件的限制较为严苛,面积可变化范围有限,这也与灌区多年种植结构固定的现实情况相吻合;另一方面说明该模型中种植面积这一决策变量对可信度水平的变化敏感性较低。图 6 为不确定性程度参数为 0.5、可信度水平为 0.7 时各决策单元作物及生态植被的种植面积。其中,决策单元 7 ~ 10 的生态植被面积明显高于主要粮食作物种植面积,这是由于红崖山灌区位于巴丹吉林和腾格里两大沙漠的相交区域,为了不让沙漠形成“合围”之势、保障民勤县人民正常生产生活,需要大量布设生态林防沙固沙、涵养生态。决策单元 1 主要包含红崖山水库及水库至民勤县城的高速公路,因此居民与农田均较少。决策单元 2 ~ 6 则主要为农田,故主要粮食作物种植面积较大,其生态植被主要分布在决策单元靠近灌区边缘的外围及主渠道的两侧,用以防风固沙和景观装饰。

表 5 主要粮食作物种植面积
Tab.5 Planting area of main grain crops

λ	小麦	玉米
0.6	7 417	3 661
0.7	7 417	3 660
0.8	7 417	3 660
0.9	7 417	3 666
1.0	7 417	3 666

3.4 作物产量与经济效益

当不确定性程度参数为 0.5 时,小麦、玉米的平均产量与经济效益见图 7。随着可信度水平的增大,小麦的平均产量从 8 354 kg/hm² 下降至 8 054 kg/hm²,经济效益由 1.416 亿元下降至 1.365 亿元,均呈现明显的下降趋势;玉米的平均产量在不同可信度水平下均保持在 12 942 kg/hm²,经

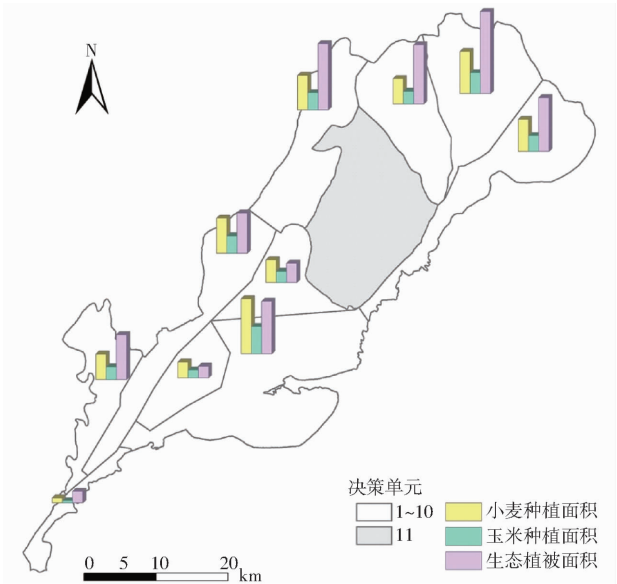


图 6 各决策单元作物及生态植被种植面积
Fig. 6 Planting area of crop and ecological vegetation in each decision-making unit

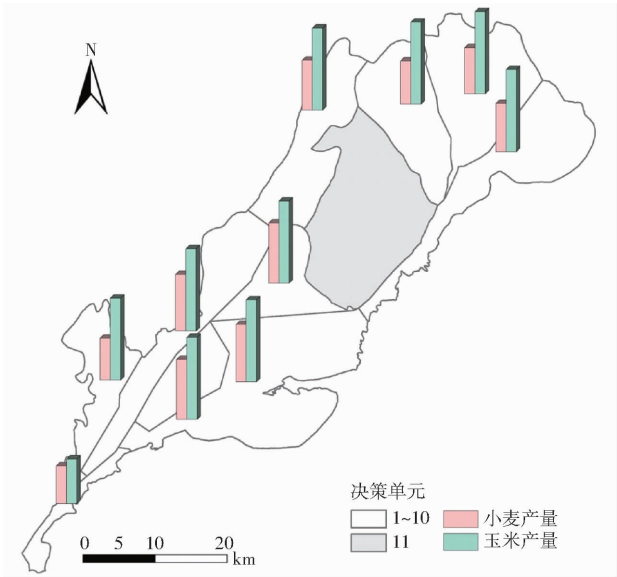


图 8 各决策单元主要粮食作物产量
Fig. 8 Yield of main grain crops in each decision-making unit

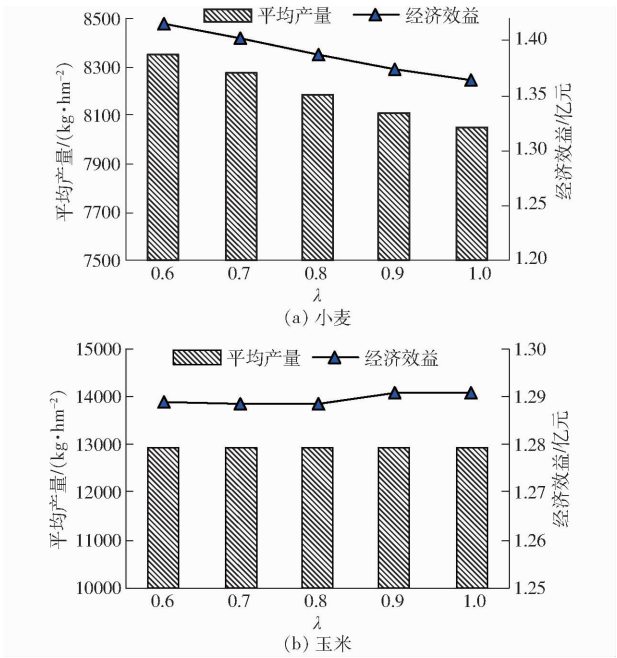


图 7 主要粮食作物平均产量与经济效益
Fig. 7 Average yield and economic benefit of main grain crops

济效益波动上升,由 1. 289 亿元先下降至 1. 288 亿元,后又上升至 1. 291 亿元。造成这种结果的原因仍然是小麦价格低成本高,而玉米价格高成本低,当两种作物的水分生产函数均表现为配水量越大产量越大时,有限的水资源被优先配置给经济效益更高的玉米,以保证其产量和收益稳定。图 8 为可信度水平为 0. 7 时各决策单元小麦、玉米的产量。玉米产量除决策单元 1 外,均为恒定的 13 563 kg/hm²,这是由于决策单元 1 的玉米种植面积过小,即使提供充足的水量,在多目标规划模型中,其经济效益也

远小于将这部分水用于其他决策单元灌溉农业或生态植被所产生的灌区综合效益,在水资源有限和多个目标权衡协调的情况下,模型选择放弃该决策单元的玉米收益以获得整个灌区的更大综合收益;各个决策单元的小麦产量则均不相同,结合图 5 可以发现,小麦配水量多的决策单元,其产量也高于其他决策单元,说明配水量对产量的影响较为明显。结合灌区管理实际,未来灌区管理部门首先应该转变种植结构,在保证粮食安全的前提下减少小麦种植,多种植玉米及其他单方水收益较高的作物;其次应当引入高效节水灌溉措施,一方面减少水资源浪费,另一方面提高单方水作物产量、增加农业收益。

4 讨论

为探讨本研究构建的模型及其求解方法在红崖山灌区应用的创新性,将前人在该灌区开展的类似研究与本研究进行比较^[34-36],结果如表 6 所示。从目标函数上看,前人构建的模型均为单目标模型,模型表现为水分生产力最大化或效益最大化;而本研究从不同决策者的角度出发,建立了考虑灌溉水量损失、生态植被配水量和经济效益的多目标模型。从不确定性方法上看,前人引入区间、双区间规划方法来表征水资源系统存在的不确定性,其取值范围过于笼统;而本研究基于传统模糊数,考虑了隶属度函数的模糊性,引入了 T2FS 来表征系统的复杂不确定性,更符合实际情景中的水土资源配置问题。从决策变量上看,前人仅针对灌区整体进行配水量优化,而本研究考虑到灌区水量分布的空间变异性,对各个决策单元的水量进行了优化配置。同时,前人仅针对灌区作物进行配水量优化,而本研究不仅

表 6 本研究模型和方法与前人研究对比

Tab.6 Model and method in this study compared with previous studies

来源	模型类别	不确定性形式	不确定性方法	决策变量	决策方案数/组
文献[34]	单目标模型	单一	区间规划	灌区作物各月配水量	3
文献[35]	单目标模型	单一	区间规划	灌区作物配水量	3
文献[36]	单目标模型	复杂	双区间规划	灌区作物各生育阶段配水量	1
本研究	多目标模型	复杂	2 型模糊规划	各决策单元作物、生态植被配水量、作物种植结构	25

考虑了作物配水量,还对灌区的生态植被进行了水量优化,更契合“沙漠绿洲”灌区的可持续发展理念。此外,本研究还优化了作物种植结构,阐述了种植结构与灌区布局的关系。从模型生成的决策方案数量上看,尽管前人依据气象因子或水平年划分情景,但得到的决策方案最多只有 3 组,而本研究通过改变 2 型模糊数的不确定性程度参数和可信度水平,能够生成至少 25 组决策方案,极大地丰富了结果,为决策者提供了更为全面的选择。总体来看,本研究无论从模型构建还是方法求解上,都比前人研究更细致、更全面、更符合实际情景。

选取不确定性程度参数为 0.5、可信度水平为 0.7 时的优化结果与前人研究作对比。崔昊杰等^[35]研究显示,小麦和玉米的单位面积最优配水量约为 5 839 m³/hm²和 9 295 m³/hm²,本研究小麦和玉米的优化配水量分别为 5 477 m³/hm²和 8 260 m³/hm²,均与崔昊杰等^[35]的结果较为接近,说明本研究结果较为可靠。崔昊杰等^[35]研究还展示了地表水、地下水的使用情况,认为小麦使用地表水和地下水联合灌溉,而玉米只需通过地表水灌溉即可,这与本研究得出的作物均需通过 2 种水源实现联合灌溉不同。由前文可知,生态植被全部采用地表水灌溉,在地表水有限的情况下,本研究较多地使用地下水灌溉玉米是合理的。此外,崔昊杰等^[35]仅通过地表水灌溉玉米,会使玉米配水量缺口较大,不利于作物生长发育,从而影响作物产量和经济效益,而本研究通过地表水、地下水联合灌溉充分保证了作物需水,使得经济效益远高于崔昊杰等^[35]研究。王航等^[36]研究得出小麦和玉米的水分生产力分别为 1.59 kg/m³和 1.83 kg/m³,分别比本研究高 5.3% 和 16.6%;赵建明^[34]研究得出小麦水分生产力为 1.36 kg/m³,比本研究低 9.9%,玉米水分生产力为 1.69 kg/m³,比本研究高 7.6%。前人研究为仅考虑水分生产力或仅考虑作物经济效益的单目标模型,其结果趋向水分生产力越大越好,而本研究建立的是考虑农业-生态

协调用水的多目标模型,其优化目标不仅要关注作物水量和经济效益,还需考虑生态植被的灌溉需求,其优化结果也不单表现为提升灌区农业用水效率、增加经济收益,还应表现灌区生态植被的健康生长、沙漠侵袭的有效防治和生态环境的可持续发展。因此,尽管本研究得到的作物水分生产力略小于前人研究,但是本研究通过考虑生态植被的灌溉需求,为灌区生态恢复和治理提供了有效的水资源配置方案,有助于防止生态植被因缺水枯萎而导致的灌区水土流失和土地荒漠化。综上所述,本研究的优化结果比前人研究考虑的要素更多,得到的结果也较为可靠,可为灌区管理部门制定合理有效的农业-生态水土资源配置方案提供参考。

5 结论

- (1)本文模型可以设置不同的可信度水平和不确定性程度来丰富配置方案,可信度水平对目标值和配水量产生的影响均大于不确定性程度。生态植被配水量对可信度水平的敏感性小,方案在风险来临时会尽可能满足生态植被需水。作物种植结构在可信度水平增大时几乎不变。灌区管理部门可以研判自身所能承受的违规风险选取合适的配置方案。
- (2)生态植被仅通过地表水灌溉,而主要粮食作物需抽取地下水补充灌溉;作物大多种植于灌区内部,而生态植被主要布设于灌区边缘以防止沙漠侵袭。灌溉水量对作物产量及经济效益的影响明显,玉米的产量及经济效益均高于小麦。灌区管理部门应在保证粮食安全的前提下改变种植结构,并引入高效节水灌溉措施以增产增收。
- (3)本文构建的模型及其求解方法均优于前人研究,得出的优化结果也比前人研究多考虑了生态因素,结果更为合理、可靠,可为灌区决策者提供较为细致、全面和贴近实际的决策方案,为西北干旱区灌区农业发展和生态建设提供科学指导。

参 考 文 献

[1] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. The United Nations world water development report 2021[R]. 2021.

[2] CAI Y, CAI J, XU L, et al. Integrated risk analysis of water-energy nexus systems based on systems dynamics, orthogonal

- design and copula analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019,99(1):125–137.
- [3] 王化齐,黎志恒,张茂省,等. 石羊河流域水资源开发的生态环境效应与国土空间优化[J]. *西北地质*, 2019,52(2):207–217.
WANG Huaqi, LI Zhiheng, ZHANG Maosheng, et al. Eco-environmental impact caused by water resources exploration and land space optimization in Shiyang River Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2019,52(2):207–217. (in Chinese)
- [4] 许耀文,王一涵,梁冬玲,等. 基于农业可持续发展的锦西灌区灌溉水资源配置研究[J]. *农业机械学报*, 2020,51(10):299–309.
XU Yaowen, WANG Yihan, LIANG Dongling, et al. Irrigation water resources allocation in Jinxi irrigation district based on agricultural sustainability[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020,51(10):299–309. (in Chinese)
- [5] TANG Y, ZHANG F, ENGEL B A, et al. Grid-scale agricultural land and water management: a remote-sensing-based multiobjective approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,265:121792.
- [6] 刘静,梅旭荣,连煜阳,等. 黄河流域农业高质量发展中水土资源优化配置研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2021,43(6):1–14.
LIU Jing, MEI Xurong, LIAN Yuyang, et al. Optimal allocation of water and land resources under high-quality agricultural development in Yellow River Basin[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021,43(6):1–14. (in Chinese)
- [7] 孙博,解建仓,汪妮. 基于模糊线性规划模型的水-土-作物系统优化配置研究[J]. *资源科学*, 2012,34(6):1101–1107.
SUN Bo, XIE Jiancang, WANG Ni. Optimal allocation of water-land-crop system based on fuzzy linear programming models[J]. *Resources Science*, 2012,34(6):1101–1107. (in Chinese)
- [8] 黄苏宁,黄显峰,方国华,等. 基于多目标遗传算法的水土资源优化配置研究[J]. *中国农村水利水电*, 2013(5):33–36.
HUANG Suning, HUANG Xianfeng, FANG Guohua, et al. Research on water and soil resources optimal allocation based on multi-objective genetic algorithm[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2013(5):33–36. (in Chinese)
- [9] 成琨. 基于复杂适应系统理论的区域水土资源优化配置与粮食安全风险分析[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2015.
CHENG Kun. Regional water-land resources optimization allocation and food safety risk analysis based on the theory of complex adaptive system[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [10] 付银环,郭萍,方世奇,等. 基于两阶段随机规划方法的灌区水资源优化配置[J]. *农业工程学报*, 2014,30(5):73–81.
FU Yinhuan, GUO Ping, FANG Shiqi, et al. Optimal water resources planning based on interval-parameter two-stage stochastic programming[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014,30(5):73–81. (in Chinese)
- [11] 杨改强,郭萍,李睿环,等. 基于排队理论的灌区渠系地表水及地下水优化配置模型[J]. *农业工程学报*, 2016,32(6):115–120.
YANG Gaiqiang, GUO Ping, LI Ruihuan, et al. Optimal allocation model of surface water and groundwater based on queuing theory in irrigation district[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016,32(6):115–120. (in Chinese)
- [12] YU H, LIU K, BAI Y, et al. The agricultural planting structure adjustment based on water footprint and multi-objective optimization models in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,297:126646.
- [13] 张帆,任冲锋,蔡宴朋,等. 基于复合多目标方法的灌区水资源优化配置[J]. *农业机械学报*, 2021,52(11):297–304.
ZHANG Fan, REN Chongfeng, CAI Yanpeng, et al. Optimally allocating of water resources among irrigation districts based on composite multiobjective method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021,52(11):297–304. (in Chinese)
- [14] 陈红光,王琼雅,李晓宁,等. 基于区间两阶段鲁棒优化模型的灌区水资源优化配置[J]. *农业机械学报*, 2019,50(3):271–280.
CHEN Hongguang, WANG Qiongya, LI Xiaoning, et al. Optimal water resources planning based on interval-parameter two-stage robust stochastic programming model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019,50(3):271–280. (in Chinese)
- [15] 王友芝,郭萍. 基于多目标规划模型的黑河中游绿洲用水结构优化配置[J]. *农业机械学报*, 2020,51(2):299–307.
WANG Youzhi, GUO Ping. Water-consumption structure optimization in oasis of middle reaches of Heihe River Basin based on multi-objective optimization model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020,51(2):299–307. (in Chinese)
- [16] 岳琼,郭萍,王友芝,等. 基于区间两阶段模糊可信性约束模型的灌区水资源配置[J]. *农业机械学报*, 2019,50(4):228–235.
YUE Qiong, GUO Ping, WANG Youzhi, et al. Optimal water allocation of irrigation district based on interval-parameter two-stage stochastic fuzzy credibility constrained programming [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019,50(4):228–235. (in Chinese)
- [17] ZADEH L A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I[J]. *Information Sciences*, 1975,8(3):199–249.
- [18] 邵先成,蔡超,王厚军,等. 基于二型模糊集推理的优化航路规划方法[J]. *计算机工程*, 2018,44(3):287–293.
SHAO Xiancheng, CAI Chao, WANG Houjun, et al. Optimal route planning method based on type-2 fuzzy sets reasoning [J]. *Computer Engineering*, 2018,44(3):287–293. (in Chinese)
- [19] ZHOU C, HUANG G, CHEN J. A type-2 fuzzy chance-constrained fractional integrated modeling method for energy system

- management of uncertainties and risks[J]. *Energies*, 2019,12:2472.
- [20] CEBI F, OTAY I. Multi-criteria and multi-stage facility location selection under interval type-2 fuzzy environment: a case study for a cement factory[J]. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2015,8(2):330-344.
- [21] LIU P, YANG L, WANG L, et al. A solid transportation problem with type-2 fuzzy variables[J]. *Applied Soft Computing*, 2014,24:543-558.
- [22] WANG C, LI Y, HUANG G, et al. A type-2 fuzzy interval programming approach for conjunctive use of surface water and groundwater under uncertainty[J]. *Information Sciences*, 2016,340-341:209-227.
- [23] YUE Q, WANG Y, LIU L, et al. Type-2 fuzzy mixed-integer bi-level programming approach for multi-source multi-user water allocation under future climate change[J]. *Journal of Hydrology*, 2020,591(2):125332.
- [24] KUNDU P, KAR S, MAITI M. Fixed charge transportation problem with type-2 fuzzy variables[J]. *Information Sciences*, 2014,255:170-186.
- [25] JAVANMARD M, NEHI HYM. A solving method for fuzzy linear programming problem with interval type-2 fuzzy numbers[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2019,21(3):882-891.
- [26] QIN R, LIU Y, LIU Z. Methods of critical value reduction for type-2 fuzzy variables and their applications[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2011,235(5):1454-1481.
- [27] 张帆, 蔡宴朋, 郭萍, 等. 灌区干支渠渗漏估算方法及其在水资源优化配置中的应用[J]. *农业工程学报*, 2021,37(4):140-147.
- ZHANG Fan, CAI Yanpeng, GUO Ping, et al. Method for estimating trunk and branch canal leakage in irrigation districts and its application in optimal allocation of water resources[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021,37(4):140-147. (in Chinese)
- [28] 张成龙, 郭萍, 赵建明. 不确定条件下的区间两阶段模糊可信性约束规划配水模型研究[J]. *中国农村水利水电*, 2016(8):97-101.
- ZHANG Chenglong, GUO Ping, ZHAO Jianming. An interval two-stage stochastic fuzzy credibility constrained programming for optimal irrigation water allocation under uncertainty[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(8):97-101. (in Chinese)
- [29] 甘肃省水利厅, 甘肃省发展和改革委员会. 石羊河流域重点治理规划[R]. 2007.
- [30] 李霆. 石羊河流域主要农作物水分生产函数及优化灌溉制度的初步研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2005.
- LI Ting. Pilot study on water production functions and optimal irrigation schedule of main crops in Shiyang River Basin[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2005. (in Chinese)
- [31] PAN Q, ZHANG C, GUO S, et al. An interval multi-objective fuzzy-interval credibility-constrained nonlinear programming model for balancing agricultural and ecological water management[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2022,245:103958.
- [32] 马心依, 栗晓玲, 张更喜. 基于归一化植被指数估算黑河中游地区植被生态耗水量[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018,46(8):55-62.
- MA Xinyi, SU Xiaoling, ZHANG Gengxi. Estimation of vegetation ecological water consumption in the middle reaches of Heihe River basin based in I_{NDV} [J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2018,46(8):55-62. (in Chinese)
- [33] GONG P, LIU H, ZHANG M, et al. Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017[J]. *Science Bulletin*, 2019,64(6):370-373.
- [34] 赵建明. 灌区多要素农业水资源优化配置研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- ZHAO Jianming. Research on multi-factor optimization of agricultural water resources allocation—a case study of irrigation areas in Minqin[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [35] 崔昊杰, 郭萍, 李茉. 基于不确定性的区间分式规划灌区优化配水模型[J]. *中国农业大学学报*, 2018,23(3):111-121.
- CUI Haojie, GUO Ping, LI Mo. Interval fractional programming optimization model for irrigation water allocation under uncertainty[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018,23(3):111-121. (in Chinese)
- [36] 王航, 郭萍, 张帆. 基于双区间规划的武威市民勤县 3 种作物灌溉水量优化模型研究[J]. *中国农业大学学报*, 2018,23(2):72-78.
- WANG Hang, GUO Ping, ZHANG Fan. Research on dual-interval programming for optimal irrigation model of three crops in Minqin County, Wuwei City[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018,23(2):72-78. (in Chinese)